

# Análisis de Recubrimientos de barrera térmica en motores de combustión interna.

J.A. Parra<sup>1</sup>, A. Sanabria<sup>2</sup>, Y. D. Torregrosa<sup>3</sup>

(1), (2), (3) Facultad de Ingeniería, Coordinación de Mecánica, Universidad Escuela Colombiana de Carreras Industriales, Bogotá Colombia  
andres.parra@retecmodiesel.com<sup>1</sup>, asanabria\_83@hotmail.com<sup>2</sup>, yesertv@hotmail.com<sup>3</sup>

*Resumen-El artículo propuesto trata sobre los recubrimiento de barrera térmica RBT con aleaciones metálicas y cerámicas los cuales tienen como objetivo fundamental proteger un material sometido a altas temperaturas de trabajo, aumentando la temperatura de servicio y manteniendo la temperatura ideal mejorando la resistencia a la oxidación y la corrosión de estos materiales, las cuales alteran sus propiedades mecánicas. En este trabajo, se hizo un análisis teórico sobre los diferentes tipos y materiales de recubrimiento de barreras térmicas aplicado a la fabricación de componentes internos de los motores de combustión interna. En este artículo propuesto tenemos unos resultados logrados que demuestran que los ciclos térmicos del motor de combustión interna están orientados a mejorar su vida útil y su rendimiento, además, el objetivo de esta investigación es que se logre reducir la energía perdida en la refrigeración y los gases de escape. El uso las barreras térmicas amplía el flujo de calor en el interior del cilindro a consecuencia de reducir las pérdidas a través de los gases de escape y la refrigeración, sin descomponer para nada la temperatura máxima de combustión, por lo tanto, las investigaciones futuras deben dirigirse hacia el desarrollo y aplicación de estos recubrimiento.*

*Abstract The proposed article deals with the thermal barrier coating RBT with metal alloys and ceramics which have as primary objective to protect a subject to high working temperatures the material, increasing the operating temperature and maintaining the ideal temperature improved oxidation resistance and corrosion of these materials, which alter their mechanical properties. In this work, we did a theoretical analysis of the different types and materials thermal barrier coating applied to the manufacture of internal components of internal combustion engines. In this article we have proposed some achieved results show that the thermal cycles of the internal combustion engine are designed to improve battery life and performance, in addition, the objective of this research is that it manages to reduce energy loss and cooling exhaust gases. Use the wide thermal barriers heat flow inside the cylinder as a result of reducing losses through the exhaust and cooling, without breaking at all the peak combustion temperature, thus future research should directed towards the development and application of these coatings*

*Palabras claves— análisis de recubrimientos, barrera térmica, motor de combustión interna*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los **recubrimientos de barrera térmica** RBT han tenido un desarrollo importante en la fabricación de componentes internos de los motores de combustión interna con el objetivo de aumentar la eficiencia térmica, disminuir el consumo de combustibles y al mismo tiempo las emisiones de gases. El desarrollo de estos recubrimientos se debe a la industria aeronáutica, esta fue la primera en recubrir componentes como la cámara de combustión principal, el sistema de post-combustión o unas secciones de la turbina del motor que están expuestos a condiciones de alta temperatura (Shin). Estas temperaturas se adquieren dependiendo de la llama adiabática del combustible empleado, convirtiendo la energía química en energía térmica con la compresión de la cantidad de oxígeno entregado en el interior de la cámara de combustión del motor. Este cambio energético genera la explosión que produce alta temperatura y a su vez la transforma en energía mecánica, por esta razón, los componentes como:

camisa, corona, sellos de pistón, válvulas de escape y válvulas de admisión, están recubiertos con barreras térmicas por lo general de materiales cerámicos, utilizando diversos métodos (YILMAZ, 2010).

## 2. MATERIALES USADOS PARA RBT

Estos materiales se emplean por tener excelentes propiedades físicas, térmicas y mecánicas, tienen un punto de fusión extremadamente alto, no sufren ningún tipo de transformación de fase con el cambio de temperatura de trabajo y la temperatura ambiente (Choque Térmico), tienen baja conductividad térmica, una buena adherencia al sustrato metálico y baja posibilidad de sinterización de la microestructura porosa (YILMAZ, 2010). Son muy pocos los materiales que poseen estas características técnicas, además, el estudio de las propiedades térmicas de la superficie de los materiales es de gran importancia para el éxito en el diseño de piezas y mecanismos de trabajo, a fin de evitar que los esfuerzos a que se encuentran

sometidas causen deformaciones, fisuras y desgaste superficial de los componentes. (Núñez Sánchez, 2005) Por lo tanto, a continuación se indican algunos materiales cerámicos usados en la industria automotriz que cumplen con estas propiedades:

#### A. CIRCONATOS

Las principales ventajas de circonatos son su actividad de baja sinterización y conductividad térmica, alto coeficiente de expansión y buena resistencia a los ciclos térmicos. Posee alto coeficiente de expansión que produce tensión residual en el revestimiento, pudiendo causar la delaminación (samadi, 2015) (X.Q. Cao, 2004) .

#### B. MULLITA O PORCELANITA ( $\text{Al}_6\text{Si}_2\text{O}_{13}$ )

Material cerámico de baja densidad, alta estabilidad térmica en entornos químicos severos, aunque presenta baja conductividad y buen comportamiento de fluencia. Tiene un coeficiente de expansión mucho más bajo que la circonia estabilizada con itria y mejor conductividad. El bajo coeficiente de expansión térmica de la mullita es una ventaja en relación con yitria circonia estabilizado en altos gradientes y en condiciones de choque térmico. Si la coincidencia en el coeficiente de expansión con el sustrato metálico no es adecuada, se conduce a una mala adhesión. Se cristaliza entre los 750-1000°C (samadi, 2015) (X.Q. Cao, 2004) .

#### C. ALÚMINA ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ )

Posee alta dureza e inercia química, tiene conductividad térmica alta y bajo coeficiente de expansión en comparación con yitria circonia estabilizada. Si se usa sola no es un buen revestimiento de barrera térmica, su adición con yitria circonia estabilizada puede aumentar la dureza del recubrimiento y mejorar la resistencia a la oxidación del sustrato. Las desventajas de alúmina es la transformación de fase que ocurre a los 1000°C y su alta conductividad y muy bajo coeficiente de expansión. (samadi, 2015) (X.Q. Cao, 2004).

#### D. ESPINELA ( $\text{MgAl}_2\text{O}_4$ )

La espinela tiene una combinación específica de propiedades deseables tales como: punto de fusión alto (2.135 °C), alta resistencia al ataque químico, buena resistencia mecánica a temperatura ambiente y altas temperaturas, baja constante dieléctrica, excelentes

propiedades ópticas y buenas propiedades catalíticas. (T. W. Dung, 2001) (F. Saito, 1999)

Aunque tiene muy buenas propiedades químicas, alta temperatura y coeficiente de expansión térmica impide su uso como una opción favorable para revestimientos de barrera térmica. Sólo hay un informe de la aplicación de la espinela de revestimiento de unión que fracasó después de 719 ciclos térmicos.

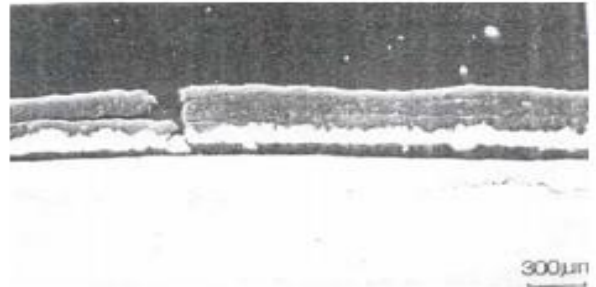


Figura 1. Recubrimiento espinela después de 719 ciclos térmicos (samadi, 2015) (X.Q. Cao, 2004).

#### E. FORSTERITA ( $\text{Mg}_2\text{SiO}_4$ )

Su alto coeficiente de expansión permite un buen uso cuando se mezcla con el sustrato. En espesores de algunos cientos de micras, muestra buena resistencia al choque térmico. (samadi, 2015) (X.Q. Cao, 2004)

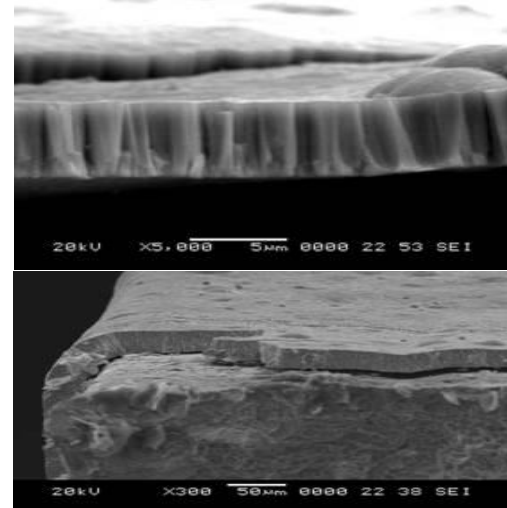


Fig. 2 y 3. Recubrimiento estabilizado con circonia yitria que muestra la microestructura en columnas (arriba) y conformación del recubrimiento en el borde del sustrato (abajo) (ULTRAMET).

### 3. RBT EN PISTONES

En los motores de combustión interna los pistones son los elementos más importantes para realizar el proceso de recubrimiento debido a que se encuentran en contacto directo con los gases de combustión y las temperaturas que estos generan, son difíciles de refrigerar debido a la mecánica de funcionamiento del mismo y que el pistón está fabricado con una aleación de aluminio y otros metales los cuales tienen la suficiente resistencia para resistir la alta presión desarrollada por la inflamación de la mezcla de aire con combustible vaporizada en el interior del cilindro. (crouise, 2010), los recubrimientos de los pistones debido a que tienen como objetivo disminuir la temperatura interna de funcionamiento y por lo tanto, conservan el calor en el interior del cilindro provocando una mayor fuerza de descenso del émbolo obteniendo mayor potencia, este recubrimiento se aplica solamente en la corona del pistón. (Cerit, 2011), su objetivo es disminuir la temperatura interna de funcionamiento conservando el calor interno en el cilindro generando mayor fuerza de desplazamiento de las bielas multiplicando la potencia; permite también la distribución uniforme del calor en la cámara de combustión reduciendo los puntos calientes, de esta manera, se mejora la combustión, como resultado se obtiene un motor de combustión con mayor potencia y con menor expansión térmica debida a la reducción del calor absorbido (YILMAZ, 2010).

#### 4. RBT EN VÁLVULAS DE ESCAPE Y ADMISIÓN

Las válvulas, las guías y los asientos de admisión son refrigeradas por el caudal de aire que entra en la cámara de combustión; ya que cuenta con aros envolventes metálicos que dirigen el flujo de aire alrededor de las válvulas para mejorar la refrigeración. (crouise, 2010) También se realiza en estos componentes un recubrimiento de barrera térmica con el objetivo de mantener el calor interno y reducir su transferencia a los componentes exteriores, el mismo reduce la temperatura de la parte posterior de la válvula de manera que el aire admitido no se caliente como lo haría si no tuviese recubrimiento, permitiendo que la densidad del aire sea mayor. Con este flujo másico de aire- oxígeno por unidad de volumen aumenta la potencia del motor, debido a la gran cantidad de oxígeno en la fase combustión. Las válvulas de escape después de la explosión se someten a elevadas temperaturas transferidas por la combustión de los gases, pueden alcanzar los 1000°C.

El objetivo del recubrimiento en estas válvulas es reducir la transferencia de calor de los gases de combustión a través de la propia válvula y la fundición de la culata, y mejorar la combustión, de esta manera, se aumenta la vida útil de las mismas, así como también el desgaste con las guías. (Creixenti, 2014) (NIKURO).



Fig. 4. Válvulas de escape y admisión con RBT. (powerplant).

#### 5. PRUEBA Y EVALUACIÓN DE LOS RBT

##### A. FATIGA TERMOMECHANICA (FTM)

En los materiales expuestos a alta temperatura la fatiga termodinámica puede influir en la durabilidad del recubrimiento de manera negativa (B. Baufeld, 2001). El origen de la fatiga termomecánica es el esfuerzo de fluencia y la deformación plástica en una de las capas que componen el recubrimiento de barrera térmica generado por el coeficiente de expansión, la falta de adherencia del material de fabricación y metal de recubrimiento, la capa de acabado, las cargas mecánicas y las fuerzas a las que está expuesta la pieza de trabajo pudiendo generar una deformación a la compresión en forma principal desde la base (R. Kitazawa, 2012). Otro daño presentado es la formación de grietas que se nuclean en la capa de adherencia a alta temperatura y se propagan en la aleación.

La fatiga termomecánica ocurre debido a la aplicación repetida de esfuerzos térmicos, la cual está asociada a cualquier componente que esté sometido a cargas térmicas de tipo cíclico y es muy común en las válvulas y pistones (Aranque M, 2000).

## B. IMÁGENES INFRARROJAS

Diseñado para evaluar el uso de los recubrimientos de barrera térmica especialmente la delaminación del recubrimiento ya mencionado antes que se presente una falla. Este descubrimiento en los daños del recubrimiento permite que una parte sea remplazada y reparada. Casi todos los métodos de monitoreo no destructivos utilizan variaciones espectrales con las propiedades ópticas de Yttria-Stabilized Zirconia (YSZ). Por ejemplo en 10,6  $\mu\text{m}$ , la longitud de onda de los láseres de CO<sub>2</sub>, YSZ es muy absorbente, pero muy visible en el infrarrojo más cercano (Robert Vaßen, 2012).

## 6. VENTAJAS DE LOS RBT EN MOTORES DE COMBUSTIÓN INTERNA.

Las barreras térmicas en los motores de combustión interna muestran una arquitectura microestructural única. Como ya se ha definido, los recubrimientos están formados por partículas parcialmente fundidas de diferentes tamaños que impactan sobre una superficie a gran velocidad y en grandes cantidades para crear un recubrimiento en los componentes de motores de combustión interna. (Parker, 2010). A continuación se indican estas ventajas:

- Se puede realizar trabajo con combustibles de bajo cetano.
- Menor cantidad de emisiones.
- Los gases de escape se pueden reutilizar para cogeneración.
- Aumento del rendimiento del motor.
- Aumento de la eficiencia térmica.
- Uso de combustibles de menor calidad.
- Retardo de la ignición reducida.
- Vaporización rápida de la mezcla de combustible.
- Reducción de consumo de combustible.
- Uso con varios tipos de combustibles.
- Disminución de golpes, ruidos y vibraciones causadas por la combustión (H., 2010) (Parlak A., 2003) (h, 1997).

## 7. CALCULO DE DESGASTE

En cualquier sistema de combustión interna se requiere hacer un cálculo de desgaste para saber la cantidad de material perdido, principalmente en las válvulas de escape, de admisión y en las coronas de los pistones, dependiente de la carga aplicada, las características de la máquina, la velocidad de deslizamiento, la distancia de deslizamiento, el ambiente, las propiedades del material y el tipo de combustible utilizado.

En situaciones donde tanto el pin como el disco se desgastan significativamente, será necesario medir la profundidad del perfil desgastado en ambos miembros. Un método adecuado usa un perfilómetro que es la única aproximación para determinar la forma final exacta de las superficies desgastadas y de este modo calcular el volumen de material perdido debido al desgaste, podemos utilizar las siguientes ecuaciones:

### Ecuación 1

$$\text{perdida de volumen valvula} = \frac{\pi (\text{diametro marca de desgaste, mm})^4}{64(\text{radio marca de desgaste, mm})}$$

### Ecuación 2

$$\text{perdida de volumen piston} = \frac{\pi(\text{radio de desgaste, mm})(\text{ancho, mm})^3}{6(\text{radio de desgaste, mm})}$$

### Ecuación 3

$$\text{volumen perdido} = \frac{\text{masa perdida, (gr)}}{\text{densidad, (gr/cm}^3)} * 1000$$

(Conshohocken, 2012), (T. Polcar, 2009)

## 8. CONCLUSIONES

Los recubrimientos de barrera térmica y su aplicación en la fabricación de componentes en motores de combustión interna garantizan una mejor eficiencia, reducción de costos de quema de combustible y menor cantidad de emisiones de gases que generan efecto invernadero.

Los recubrimientos también permiten que el calor sea distribuido más uniformemente sobre la superficie de contacto, reduciendo la formación de puntos calientes y disipar el calor dentro de la cámara de combustión para mejorar su distribución y así mejorar la eficiencia de la misma. Esto permite que mayor cantidad de partículas de combustible reaccionen térmicamente y utilicen menor cantidad de combustible para generar la misma potencia.

El resultado es un motor que tiene más potencia, que funciona con una mezcla de combustible más pobre, con menos avance de encendido y sufre menor expansión térmica debido a una reducción en el calor absorbido.

La aplicación de recubrimientos de barrera térmica en componentes de la zona de combustión de un motor como la corona del pistón y las válvulas de escape y admisión produce mejoras significativas en la eficiencia térmica y mecánica. Con esta propuesta se analiza la aplicación de recubrimiento del pistón y las válvulas de un motor de combustión interna sirviendo como guía de referencia para los investigadores que trabajan en esta área.

Es importante destacar que los recubrimientos de barrera térmica aíslan térmicamente el gas en expansión dentro del cilindro mediante un aumento de la resistencia térmica que da el material del recubrimiento, con la consecuencia de un aumento de la temperatura del gas, de esta manera, se logra un aumento de la potencia para una misma cantidad de combustible.

## 9. REFERENCIAS

1. Shin, I. H. (2013). Assessment of the Characteristic of Thermal Barrier Coating Applied to Gas Turbine Blade by Thermo-Gradient Mechanical Fatigue Test. En I. H. Shin, procedia engineer (págs. 210-213). Edited by S.C. Chetal, T. Jayakumar, R. Sandhya, K. Laha and M.D. Mathew.
2. Shin, I. H., Lee, D. K., Kim, Y. S., Koo, J. M., Seok, C. S., & Test", T. W.-G. (s.f.).
3. YILMAZ, İ. T. (2010). THERMAL BARRIER COATINGS FOR DIESEL ENGINES. INTERNATIONAL SCIENTIFIC CONFERENCE, 173-177.
4. Núñez Sánchez, M. D. (2005). Recubrimientos metal, metal-cerámicos, cerámicos obtenidos por proyección plasma para aplicaciones de resistencia al desgaste y a la temperatura.
5. Samadi, h. (2015). Alternative\_Thermal\_Barrier\_Coatings\_for\_Dies el\_Engines. academia.edu, 1-12.
6. ULTRAMET. (s.f.). <http://www.ultramet.com/>. Recuperado el 25 de 04 de 2014, de <http://www.ultramet.com/>: [http://www.ultramet.com/ceramic\\_protective\\_coatings.html](http://www.ultramet.com/ceramic_protective_coatings.html)
7. X.Q. Cao, R. V. (2004). Ceramic materials for thermal barrier coatings. Journal of the European Ceramic Society, 1-10.
8. T. W. Dung, L. R. (2001). T. W. Dung, Magnesium aluminate (MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) spinel produced via self-heat-sustained (SHS) technique.
9. Crouise, w. h. (2010). mecanica del automovil. barcelona: boixareu.
10. Powerplant. (s.f.). [www.racingpowerplant.com](http://www.racingpowerplant.com/). Recuperado el 20 de 02 de 2015, de [www.racingpowerplant.com](http://www.racingpowerplant.com/): [http://www.racingpowerplant.com/bmw\\_m10.htm](http://www.racingpowerplant.com/bmw_m10.htm)
11. Revestimientos-especiales.blogspot.com. (6 de junio de 2011). Recuperado el 30 de mayo de 2015, de [revestimientos-especiales.blogspot.com](http://revestimientos-especiales.blogspot.com/): <http://revestimientos-especiales.blogspot.com/2011/06/6-recubrimientos-de-barrera-termica-tbc.html>
12. Revestimientos-especiales.blogspot.com. (06 de 06 de 2011). [revestimientos-especiales.blogspot.com](http://revestimientos-especiales.blogspot.com/). Recuperado el 20 de 08 de 2015, de [revestimientos-especiales.blogspot.com](http://revestimientos-especiales.blogspot.com/): <http://revestimientos-especiales.blogspot.com/2011/06/6-recubrimientos-de-barrera-termica-tbc.html>
13. Cerit, M. (2011). Thermo mechanical analysis of a partially ceramic coated piston used in an SI engine. Surface & Coatings Technology.
14. Creixenti, T. M. (2005). universidad politecnica de cataluña. Obtenido de <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/22639/Estudio%20y%20an%20lisis%20de%20os%20recubrimientos%20de%20barrera%20rmica%20en%20motores%20diesel.pdf;jsessionid=EFF8CA2046B35E50558B895E1ECE4BA7?sequence=1>

15. Creixenti, T. M. (2014). Estudio y Análisis de los Recubrimientos de Barrera Térmica En Motores Diésel. En T. M. Creixenti, Estudio y Análisis de los Recubrimientos de Barrera Térmica En Motores Diése (págs. 3-10). España.
16. NIKURO, G. W. (s.f.). [www.salvadorlivio.com](http://www.salvadorlivio.com). Recuperado el 28 de 08 de 2015, de [www.salvadorlivio.com](http://www.salvadorlivio.com): <http://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&e src=s&source=web&cd=1&ved=0CB0QFjAAah UKEwjO-Iehl9HHAhXCXh4KHTwNBGw&url=http%3A%2F%2Fwww.salvadorlivio.com.uy%3A8080%2Fclientes%2FInfTec%2FG.V.G.%2520-%2520Uso%2520y%2520recomendaciones.pdf&ei=PynjVY7dEcK9ebyakOA>
17. R. Kitazawa, P. T. (2012). The University of Tokyo .
18. B. Baufeld, E. T. (2001). Mater. Sci. Eng.
19. Robert Vaßen, Y. K. (2012). Testing and evaluation of thermal-barrier coatings. proquest, 911-916.
20. Aranque M, J. F. (2000). Mecanismo para medir temperatura en la cara del pistón de un motor de combustión interna.
21. F. Saito, W. K. (1999). Effect of grinding on synthesis of MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> spinel from a powder mixture of Mg(OH)<sub>2</sub> and Al(OH)<sub>3</sub>, Powder Technol.
22. Parker, D. H. (2010). Tecnología de los recubrimientos de superficies.
23. H., H. (2010). Cotton methyl ester usage a diesel engine equipped with insulated combustion chamber. Applied Energy, 134-140.
24. Parlak A., Y. H. (2003). Performance and exhaust emission characteristics of a lower compression ratio LHR diesel engine. Energy Conversion and Management, 163-175.
25. Conshohocken, W. (2012). Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus 1
26. T. Polcar, M. E. (2009). "Comparative study of the tribological behavior of self-lubricating W-S-C and Mo-Se-C sputtered coatings.
27. h, y. (1997). Termal bariyer kaplamanın turbo doldurmalı bir dizel motorunun performansına etkileri. istanbul: doktora tezi

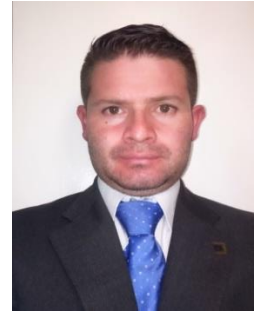
## 10. AUTORES.

ALEXANDER SANABRIA GONZALEZ.



Ingeniero mecánico automotriz, con experiencia en auditoria, peritaje y analista de repuestos; en diferentes compañías del sector automotriz y de aseguramiento. Reconocido por dar cumplimiento a los diferentes procesos y procedimientos establecidos por la compañía.

JOSE ANDRES PARRA JIMENEZ.



Ingeniero mecánico industrial, con experiencia en mantenimiento de transmisiones Allison, ZF y Caterpillar, auditor de control de calidad bajo la norma ISO 9001-2008. Reconocido por generar satisfacción total a los clientes de los sectores: industrial, minero, naval, petróleo, transporte liviano y pesado.

YESER DAVID TORREGROSA VIANA



Ingeniero mecánico industrial, con experiencia en la parte de mantenimiento industrial y ejecutar los planes de mantenimiento; en diferentes compañías del sector industrial. Reconocido por operar en el manejo de máquinas industriales, herramientas mecánicas establecidos por la compañía.